

**РОССИЙСКОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО**

**ЕЖЕГОДНИК  
2008**

**АКУСТИКА НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД**

**СБОРНИК ТРУДОВ  
СЕМИНАРА НАУЧНОЙ ШКОЛЫ  
ПРОФ. С.А. РЫБАКА**

**Е.А. Васильев**

## **ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ И ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ**

*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Отделение теоретической физики  
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53  
Тел.: (499) 1326172; E-mail: eugvas@lpi.ru*

*В данной работе представлен обзор современного состояния дел в области космологии, в особенности вопросов о тёмной материи и тёмной энергии – новых, плохо изученных компонент Вселенной, которые вместе составляют около 95% полной плотности энергии Вселенной. Рассмотрены наблюдательные свидетельства и теоретические аргументы в пользу существования тёмной материи и тёмной энергии, представлены возможные кандидаты на роль тёмной материи и тёмной энергии и описаны дальнейшие способы исследования этих форм вещества.*

### **1. Введение**

В последние годы в космологии и вообще физике широко обсуждаются вопросы о существовании новых, ранее неизвестных форм вещества – тёмной материи и тёмной энергии (это два совершенно различных понятия). Связано это в значительной степени с успехами наблюдательной космологии в последнее десятилетие, хотя вопрос о тёмной материи впервые был поднят ещё в 1933 году. В этой обзорной работе вкратце рассказано, почему современной науке необходимы эти понятия, какие данные свидетельствуют в пользу их существования и каковы их феноменологические свойства, перечислены возможные кандидаты на роль этих форм вещества и способы дальнейшего исследования их свойств.

### **2. Тёмная материя**

Тёмной материей в астрофизике и космологии принято называть ту долю вещества во Вселенной, которая не излучает электромагнитные волны. Это могут быть потухшие звёзды, объекты планетного типа, чёрные дыры, или же новый сорт элементарных частиц. Обнаружить её наличие можно, в первую очередь, благодаря её гравитационному влиянию на видимое вещество.

Исторически первым наблюдательным свидетельством в пользу существования невидимого вещества было измерение дисперсии скоростей отдельных галактик в скоплениях (Ф.Цвикки, В.К.Зворыкин, 1933 г). Если предполагать, что скопления галактик находятся в динамическом равновесии (что оправдано, поскольку возраст их намного больше характерного динамического времени), то средняя кинетическая и потенциальная энергии связаны теоремой вириала, которая для самогравитирующих систем звучит следующим образом:  $2E_{kin} + E_{pot} = 0$ , где кинетическая энергия  $E_{kin} = \frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle$ , а потенциальная  $E_{pot} = GM^2/r$  ( $M$  – масса скопления,  $r$  – радиус,  $v$  – характерная дисперсия скоростей галактик). Отсюда, зная радиус и дисперсию скоростей, можно оценить массу

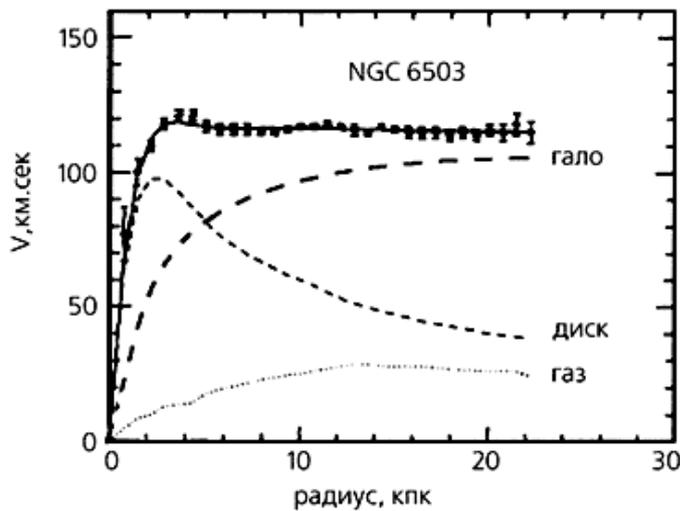


Рис. 1. Кривая вращения типичной спиральной галактики

данного радиуса:  $v^2/r = G M_{in}(r)/r^2$ . Если брать достаточно удалённые от центра звёзды, то естественно ожидать, что практически вся масса галактики сосредоточена внутри их орбит и, следовательно,  $v \sim r^{-1/2}$ . На деле же оказывается, что вплоть до самых далёких от центра звёзд круговая скорость практически постоянна, что говорит о том, что масса галактики растёт примерно пропорционально радиусу и не стремится к определённому пределу в диапазоне наблюдаемых расстояний. Объяснением этому может служить то, что чем дальше от центра галактики, тем большую долю массы составляет несветящееся вещество, т.е. на самом деле полный радиус и масса галактики гораздо больше, чем наблюдаемая яркая центральная часть.

Ещё более недавним аргументом в пользу того, что полные массы галактик гораздо больше, чем масса светящегося вещества, служат наблюдения гравитационного линзирования. Суть эффекта в том, что свет от далёкой галактики отклоняется гравитационным полем другой галактики или скопления, находящегося на луче зрения между наблюдателем и далёкой галактикой. В результате изображение далёкой галактики искажается характерным образом — появляются т.н. «кольца Эйнштейна» или дуги, по анализу которых можно оценить массу галактики-линзы. Сопоставляя её с массой светящегося вещества в линзирующей галактике, вновь оказывается, что полная гравитирующая масса, ответственная за отклонение света, гораздо больше массы видимой части галактики.

Наконец, очень важным независимым свидетельством в пользу существования другого вида материи, отличного от известного нам барионного вещества, служит космологический, или структурный аргумент. Суть его достаточно проста. Наблюдения анизотропии реликтового микроволнового излучения, проводящиеся с 1990-х годов, показывают, что относительная амплитуда флуктуаций температуры излучения составляет величину порядка несколько единиц  $\times 10^{-5}$ . Реликтовое излучение — это тепловое излучение, дошедшее до нас из ранней Вселенной, когда её возраст составлял примерно 400 тыс. лет, а температура — 3000 К. Это время соответствует рекомбинации водородной плазмы и резкому увеличению прозрачности среды из нейтральных атомов для электромагнитного излучения. Однородность температуры реликтового фона (в настоящее время она равна 2.73 К) свидетельствует о том, что плотность барионного вещества была однородна в той же степени, т.к. до рекомбинации электромагнитное излучение бы-

скопления, которая оказывается примерно на два порядка больше, чем масса, сосредоточенная в звёздах.

В 70-е годы начали проводиться систематические высокоточные наблюдения кривых вращения спиральных галактик (В.Рубин и др.), в результате которых было открыто, что очень многие галактики имеют плоские кривые вращения (рис.1). Согласно ньютоновской динамике, объект (например, звезда) на круговой орбите на расстоянии  $r$  от центра галактики должен вращаться со скоростью, определяемой полной массой в пределах

ло сильно связано с плазмой из-за томсоновского рассеяния. Акустические колебания в плазме не могли усиливаться (на масштабах, меньших размера горизонта), а после рекомбинации в нейтральном газе возникла джинсовская гравитационная неустойчивость, приводящая к росту флуктуаций плотности на достаточно больших длинах волн и, как следствие, к образованию наблюдаемой структуры Вселенной – галактик и скоплений галактик, в которых формировались звёзды. У такой картины есть один существенный изъян: согласно теории, амплитуда флуктуаций растёт линейно с размером Вселенной, который с момента рекомбинации увеличился примерно в 1000 раз (во столько же раз упала температура реликтового излучения). Тем самым, зная из наблюдений амплитуду флуктуаций плотности в барионном веществе на уровне  $10^{-5}$ – $10^{-4}$ , к настоящему времени они были бы на уровне  $10^{-2}$ – $10^{-1}$ , т.е. ни о каких нелинейных объектах с контрастом плотности больше единицы (в частности, галактиках) не было бы и речи. Это противоречие можно устранить, допустив, что помимо барионного вещества, взаимодействующего с излучением вплоть до рекомбинации, существует другой сорт материи, которая «отцепляется» от излучения раньше, и амплитуда флуктуаций в ней к моменту рекомбинации может вырасти существенно выше.

Таким образом, картина возникновения структуры Вселенной выглядит следующим образом [1]. Флуктуации плотности в тёмной материи «вырастают» до нелинейного уровня быстрее, чем в обычном веществе, и первые гравитационно-связанные объекты образуются из тёмной материи (их называют гало). Обычная же материя «стекает» в потенциальную яму гало тёмной материи, охлаждаясь и излучая энергию (чего бездиссипативная тёмная материя сделать не может), и оседает на дне потенциальной ямы, формируя видимые объекты – галактики. Это объясняет и то, почему тёмная материя преобладает над обычной на периферии галактик – видимое вещество оказывается более концентрированным к центру. Моделирование образования крупномасштабной структуры Вселенной [2] предсказывает, что в масштабах от размеров галактики (~100 килопарсек) до ~100 мегапарсек распределение вещества в пространстве напоминает волокнистую структуру с узлами (сверхскоплениями), нитями и двумерными образова-

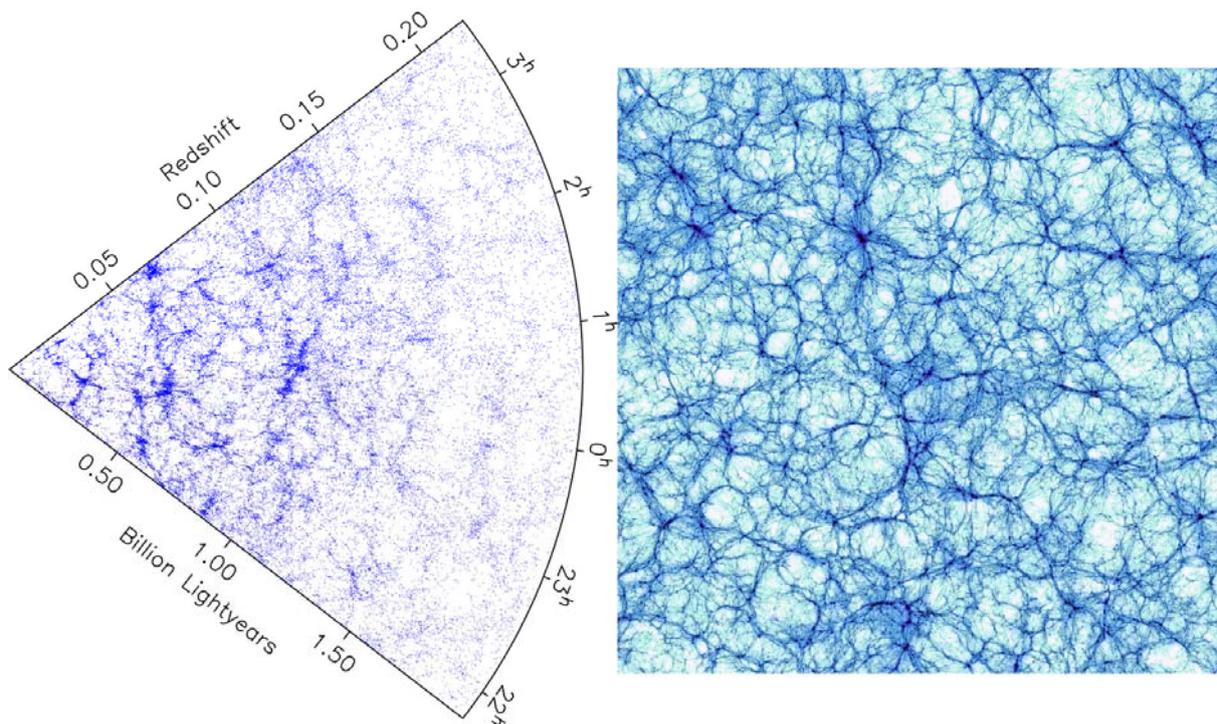


Рис.2. Слева: наблюдения распределения галактик в пространстве (по данным каталога 2dF); справа: результаты моделирования образования крупномасштабной структуры Вселенной (Millenium simulation).

ниями – т.н. «блинами Зельдовича». Это хорошо согласуется с наблюдениями последних лет, нацеленными на построение трёхмерной карты распределения галактик в космосе (например, Слоановский цифровой обзор неба (SDSS) или Двухградусный обзор галактик (2dFGRS), рис.2).

Перечисленные выше астрономические аргументы делают существование тёмной материи практически доказанным эмпирически, но вопрос об её физической природе остаётся открытым. Прежде всего, имеется возможность объяснить большинство наблюдаемых эффектов, если модифицировать второй закон Ньютона при очень малых ускорениях: вместо  $F=ma$  положить  $F=m\mu(a/a_0)a$ , где функция  $\mu(x)$  при больших  $x$  стремится к 1, а при малых – к  $x$ . Величина  $a_0$  играет роль мировой константы размерности ускорения. В земных условиях тяготение Солнца достаточно сильно, чтобы эффект от этой модификации был пренебрежимо мал, но на больших расстояниях он начинает проявляться. Эта гипотеза была предложена Милгромом в 1983 г под названием «Модифицированная ньютоновская динамика» (MOND), а с 2004 г Бекенштейном и др. развивается её релятивистское обобщение – тензор-вектор-скалярная гравитация (TeVeS); существуют и другие альтернативы ОТО, нацеленные на объяснение феномена тёмной материи.

Если же оставаться в рамках теории гравитации Эйнштейна, то приходится предположить существование скрытого вещества, которого в среднем во Вселенной в 5–6 раз больше, чем видимого вещества. Оно не может состоять из обычного газа, т.к. в гравитационном поле галактики или скопления галактик газ должен иметь очень высокую температуру (порядка  $10^6$  К) и быть хорошо виден в рентгеновском диапазоне; наблюдения показывают, что масса свободного газа во Вселенной примерно на порядок больше массы звёзд, но всё же существенно меньше, чем требуется для объяснения наблюдаемых масс галактик. Другая возможность состоит в том, что скрытое вещество находится в форме массивных компактных объектов (MACHO): это могут быть объекты планетного типа («юпитеры»), потухшие или очень слабые звёзды, чёрные дыры и т.д. Несмотря на их «невидимость», всё же существует возможность оценить плотность таких объектов с помощью гравитационного микролинзирования. Суть эффекта аналогична обычному гравитационному линзированию, но в роли источника света выступает звезда нашей или ближайших галактик, а в роли линзы – тёмный объект, пролетающий между наблюдателем и звездой. Искажения формы изображения источника в этом случае будут не видны (источник точечный), но яркость источника будет меняться характерным образом (симметрично во времени и одинаково на всех длинах волн), что позволяет отличить такое событие от переменности звезды. Характерные времена события микролинзирования – десятки и сотни суток, и для эффективной регистрации необходимо одновременное наблюдение за большим количеством звёзд-источников ( $\sim 10^6$ ), что стало возможным в 1990-е годы (эксперименты OGLE, MACHO, EROS). Результаты наблюдений показывают, что компактные объекты могут составлять не более 20% от скрытой массы гало галактик, и т.о. не подходят на роль единственного объяснения тёмной материи. (Попутно отметим, что микролинзирование также служит одним из способов обнаружения внесолнечных планет).

Наиболее общепринятой в настоящее время является точка зрения, что тёмная материя состоит из элементарных частиц, ещё не открытых на ускорителях [3]. Эти частицы должны быть стабильными на космологических временах ( $10^{10}$  лет), не участвовать в электромагнитном и сильном взаимодействиях и быть достаточно тяжёлыми и «холодными», чтобы формировать самогравитирующие объекты. (Нейтрино не подходят на эту роль по причине слишком малой массы и тем самым высокой скорости). Наиболее вероятными кандидатами на эту роль называют нейтралино  $\chi$  – гипотетиче-

ские суперсимметричные партнёры бозонов Стандартной модели. Их массы, предположительно, составляют 100–1000 ГэВ, и, таким образом, есть надежда обнаружить их рождение в ходе экспериментов на Большом адронном коллайдере (LHC). Кроме того, есть и другие способы прямой регистрации частиц тёмной материи, например, в экспериментах по рассеянию их в большом объёме вещества детектора (аналогично регистрации нейтрино). Некоторые эксперименты (например, DAMA в лаборатории Gran Sasso) уже сообщают о возможном положительном сигнале. Помимо этого, существуют косвенные методы обнаружения тёмной материи, связанные с детектированием продуктов их аннигиляции: нейтралы являются тождественной своей античастице и имеют ненулевое (но очень малое) сечение двухчастичного распада, в результате которого в конечном итоге образуются фотоны, электрон-позитронные пары, нейтрино и прочие обыкновенные частицы. Поскольку интенсивность столкновений частиц пропорциональна квадрату плотности, то наиболее эффективно аннигиляция должна происходить в областях наибольшей концентрации тёмной материи – в центрах галактик и более мелких гало. Наблюдения в гамма-диапазоне ведутся на ряде наземных и космических установок и дают ограничения на возможные значения массы и сечения аннигиляции частиц тёмной материи.

В целом, парадигма тёмной материи, состоящей из элементарных частиц, в настоящее время считается общепринятой в физике и связывает такие на первый взгляд далёкие её разделы, как космология/астрофизика и физика элементарных частиц (такой симбиоз именуют космомикрорфизикой). По совокупности данных, средняя плотность тёмной материи примерно в пять раз выше, чем барионной, и составляет около 23% от так называемой критической плотности. (В космологической модели Фридмана критическая плотность соответствует пространственно плоской Вселенной). Однако тайны на этом не заканчиваются: за последнее десятилетие выяснилось, что ещё 73% плотности энергии во Вселенной составляет так называемая тёмная энергия.

### 3. Тёмная энергия

Эмпирическое определение тёмной энергии таково: это однородно заполняющая пространство субстанция с положительной плотностью энергии  $E$  и отрицательным давлением  $P$ . Иногда также говорят об антигравитации: дело в том, что в уравнениях Фридмана для расширения Вселенной входит комбинация  $E+3P$ , которая для нормального вещества положительна и соответствует замедлению расширения за счёт притяжения, а для тёмной энергии (или, более общо, т.н. экзотической материи) отрицательна, что эффективно соответствует отталкиванию и ускоренному расширению.

Одно из главных свидетельств в пользу ускоренного расширения появилось из наблюдений сверхновых типа Ia на больших (космологических) расстояниях, которые систематически проводятся с середины 1990-х г. Для этих сверхновых возможно по кривой блеска определить истинную светимость, а зная видимую яркость объекта, и расстояние до него. С другой стороны, по спектральным линиям определяется красное смещение, а связь его с расстоянием определяется историей расширения Вселенной. Из анализа наблюдений следует, что последние несколько миллиардов лет Вселенная расширяется с ускорением, что невозможно без допущения существования антигравитации или субстанции с отрицательным давлением. В пользу её наличия говорит и другой связанный с этим «возрастной» аргумент: в космологической модели без тёмной энергии возраст Вселенной оказывается слишком мал (<11 млрд. лет), что противоречит данным по возрасту самых старых звёзд и шаровых скоплений. При наличии ускорен-

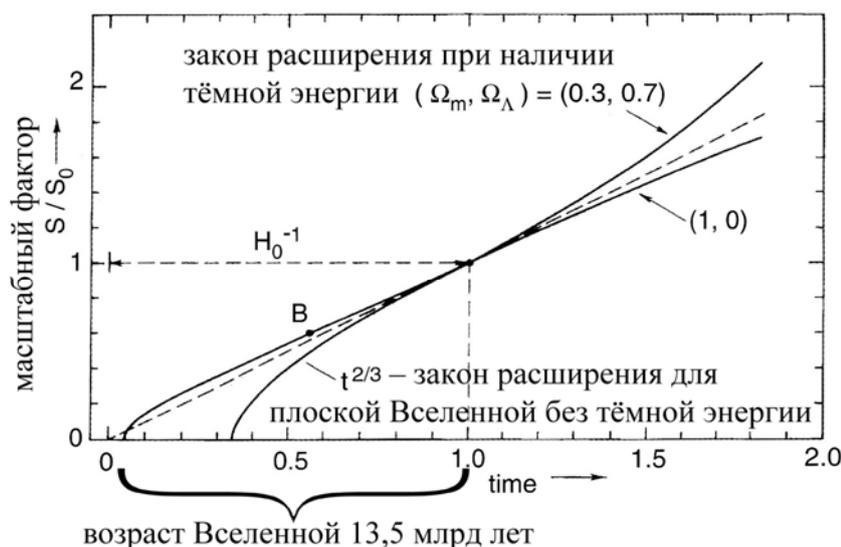


Рис.3. Расширение Вселенной в случае наличия (верхняя) и отсутствия (нижняя кривая) тёмной энергии. В первом случае возраст оказывается больше при той же скорости расширения в настоящее время (постоянной Хаббла  $H_0$ ), а в точке В замедление сменяется ускорением.

ного расширения в недавнюю эру оценка возраста увеличивается до 13.5–14 млрд. лет, устраняя противоречие (рис.3).

Независимым аргументом служат данные по реликтовому излучению, которые устанавливают ограничение на полную плотность всех видов вещества во Вселенной очень близко к критической плотности ( $\Omega=1$ ). Так как барионная и тёмная материя в сумме составляют около 27% от критической плотности, остальные 73% относятся к тёмной энергии, причём её уравнение состояния (связь давления с плотностью энергии) очень близко к вакуумному ( $P=-E$ ). Поэтому часто говорят о тёмной энергии как о космологическом  $\Lambda$ -члене, или энергии вакуума. В уравнениях Эйнштейна можно добавить универсальную константу  $\Lambda$ , которую можно интерпретировать как плотность энергии вакуума. Фундаментальный недостаток этой интерпретации в том, что величина эта из наблюдений оказывается экстремально малой, в то время как теоретические соображения дают или ноль, или значение на 120 порядков больше. Другая альтернатива состоит в том, что это не вакуум, а новый сорт материи, например, скалярное поле, которое обладает схожим эффективным уравнением состояния.

Особым свойством тёмной энергии является независимость (или очень слабая зависимость) её плотности от размера Вселенной. Если для обычного (и тёмного) вещества с увеличением масштабного фактора Вселенной  $a$  плотность  $\rho$  падает как  $a^{-3}$ , а для релятивистского (например, реликтового излучения) — как  $a^{-4}$ , то для тёмной энергии  $\rho \approx \text{const}$ , и следовательно, в ходе расширения её плотность рано или поздно начнёт доминировать над обычным веществом, и расширение станет ускоряться. Загадка, или проблема совпадений, состоит в том, что, во-первых, этот момент наступил как раз «недавно» (т.е. когда Вселенная была примерно на треть моложе, чем сейчас), а во-вторых, амплитуда начальных флуктуаций плотности в веществе была такой, что галактики как раз успели возникнуть (возмущения перешли в нелинейную стадию) до того, как тёмная энергия начала доминировать в динамике расширения [4]. Следует ещё отметить, что общепринятая в настоящее время модель инфляционной стадии Вселенной (расширявшейся с экспоненциальным ускорением в первые  $10^{-30}$  секунд после

Большого взрыва), с одной стороны, хорошо объясняет начальные условия (в том числе близость полной плотности к критической и спектр начальных возмущений плотности), а с другой, имеет много общего с явлением тёмной энергии, которая также обеспечивает в будущем экспоненциальное расширение – до тех пор, пока уравнение состояния будет близко к вакуумному. Чтобы делать более точные предсказания о дальнейшей судьбе Вселенной и приблизиться к пониманию природы тёмной энергии, необходимо, с одной стороны, более точные измерения эволюции её параметров во времени (в прошлом) и, возможно, пространственной неоднородности, а с другой, развитие теоретической базы. Пока что существуют множество теорий о микроскопической природе тёмной энергии, наиболее привлекательным считается описать её и тёмную материю в рамках одной унифицированной теории, но никакого даже близкого к общепринятому взгляда не выработано.

### Заключение

В заключение приведём сравнительную таблицу свойств тёмной материи и тёмной энергии (во всех ячейках можно добавить слово «вероятно» или «возможно»).

Тёмная материя	Тёмная энергия
Состоит из элементарных частиц	Энергия вакуума? Скалярное поле?
«Холодная» ( $P=0$ )	Уравнение состояния $P \approx -E$
Образует гравитационно-связанные объекты и ответственна за формирование структуры Вселенной	Однородно заполняет пространство
Есть надежда на экспериментальное обнаружение в ближайшее время	Многочисленные теории, эксперимент пока невозможен
Похожа на барионную материю	Является «экзотической материей»

Открытия последнего времени показали, что 95% материи во Вселенной существуют в форме новых, неизвестных ранее видов вещества и свидетельствуют о неполноте наших знаний о физике микромира, странным образом связывая физику в самых больших и самых малых масштабах. Мы вновь находимся на пороге фундаментальных открытий.

Я благодарю К.А.Постнова за ценные замечания по тексту статьи. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №07-02-01128) и Совета по грантам Президента РФ (проекты НШ-438.2008.2 и МК-446.2008.2).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лукаш В.Н., Михеева Е.В. Тёмная материя: от начальных условий до образования структуры Вселенной // УФН 2007, т.177, с.1023.
2. Springel V., et al. The large-scale structure of the Universe // Nature 2006, v.440, p.1137.
3. Bertone G., Hooper D., and Silk J. Particle dark matter: evidence, candidates, and constraints // Phys.Rept. 2005, v.405, p.279.
4. Лукаш В.Н., Рубаков В.А. Тёмная энергия: мифы и реальность // УФН 2008, т.178, с.301.